

## 基于 Gires-Tournois 谐振腔的二维光学相控阵反射镜

高露, 刘庆文\*, 何祖源

上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

**摘要** 光学相控阵是激光雷达中实现非机械光束偏转的一种技术方案, 针对现有光学相控阵存在的尺寸大、二维集成困难等问题, 提出了一种可实现二维光束偏转的新型二维光学相控阵反射镜。该反射镜采用易于集成的面阵结构, 同时利用 Gires-Tournois 谐振腔在谐振波长附近的色散特性放大相移。仿真结果表明, 该结构在谐振波长附近具有较高的相移效率, 为实现二维光束偏转提供了一种新的解决方案。

**关键词** 光学器件; 二维光学相控阵; Gires-Tournois 谐振腔; 反射镜; 光束偏转

**中图分类号** TN256

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/AOS202141.0723001

## Two-Dimensional Optical Phased Array Reflector Based on Gires-Tournois Resonator

Gao Lu, Liu Qingwen\*, He Zuyuan

State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks,  
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** Optical phased array is a technical solution to realize non-mechanical beam steering in laser radar. In view of the large size and difficulty of two-dimensional integration of the existing optical phased arrays, we propose a new two-dimensional optical phased array reflector that can realize two-dimensional beam steering. The reflector adopts an easy-to-integrate area array structure and employs the dispersion characteristics of the Gires-Tournois resonator near the resonance wavelength to amplify the phase shift. Simulation results showed that the structure has a high phase shift efficiency near the resonance wavelength, and provides a new solution for realizing two-dimensional beam steering.

**Key words** optical devices; two-dimensional optical phased array; Gires-Tournois resonator; reflector; beam steering

**OCIS codes** 230.3120; 230.1480; 130.3120

### 1 引言

相比微波雷达、超声波雷达等传统技术, 激光雷达用发散角小、能量集中、相干性好的激光作为探测媒介, 具有更高的角分辨率、速度分辨率和距离分辨率等<sup>[1]</sup>。光束偏转技术是激光雷达的核心技术之一, 目前, 激光雷达主要采用机械扫描的方式实现光束偏转, 存在体积大、耐用性差等缺点<sup>[2]</sup>。而光学相控阵无需机械扫描, 且具有尺寸小、能耗低等特点,

得到了人们的广泛关注<sup>[3]</sup>。Meyer<sup>[4]</sup>用钽酸锂材料制作了  $1 \times 46$  波导光学相控阵, 通过改变电压控制光束的偏转角, 验证了用光学相控阵实现光束偏转的可行性。Kwong 等<sup>[5]</sup>制作了  $1 \times 12$  光学相控阵, 其中, 热光移相器的长度为  $500 \mu\text{m}$ , 采用热调的方式在硅平面波导内实现了  $10.2^\circ$  的扫描范围, 由于折射的存在, 等效于在空气中  $31.9^\circ$  的扫描范围。van Acoleyen 等<sup>[6]</sup>提出了采用热调方式的  $1 \times 16$  光学偏转结构, 其中, 移相器的长为  $450 \mu\text{m}$ , 实现了

收稿日期: 2020-06-22; 修回日期: 2020-08-14; 录用日期: 2020-11-11

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405500)

\* E-mail: liuqingwen@sjtu.edu.cn

23°的扫描范围,并验证了通过改变扫描波长实现纵向扫描的可行性。Yaacobi 等<sup>[7]</sup>采用热调方式在 1550 nm 波长处实现了 51°的扫描范围,且该结构在 1200~3500 nm 波段内都有效。van Acoleyen 等<sup>[8]</sup>在一维结构光学相控阵上实现了二维方向上的扫描,通过热调方式在横向实现了 2.3°的扫描范围,并利用波长变化实现了纵向 14.1°的扫描范围。Hutchison 等<sup>[9]</sup>采用 1×128 不等间距的波导结构,在横向采用热光调制方式实现了 80°的扫描范围,并利用片外可调谐激光源实现了纵向 17°的扫描范围。van Acoleyen 等<sup>[10]</sup>实现了二维结构的光学相控阵,仅采用波长调谐,在横向利用阵列波导光栅延迟线实现了 50°的扫描范围,在纵向利用光栅耦合器实现了 17°的扫描范围。Hulme 等<sup>[11]</sup>在混合硅平台上制作了一个全集成的二维光学相控阵,结合热调和波长调谐方式实现了 23°×3.6°的扫描范围,在全集成光学相控阵芯片道路上迈出了重要的一步。Poulton 等<sup>[12]</sup>采用分组级联的移相器实现了 46°×36°的扫描范围,并实现了全固态相干光探测的激光雷达。Sun 等<sup>[13]</sup>实现了阵列数为 64×64 的无源和 8×8 的有源大规模集成二维相控阵列,并通过加热掺杂硅的方式改变相位,实现了二维方向上的扫描。Zhao 等<sup>[14]</sup>提出了一种以微环为移相器的二维光学相控阵列,利用微环的谐振作用实现较高的相移效率。

综上所述,目前光学相控阵二维方向上的角度扫描技术主要通过两种方式实现。一种是基于二维的光学相控阵结构(1×N),该结构在横向采用移相器实现角度扫描,在纵向通过波导光栅耦合器利用波长调谐实现扫描,但角度扫描范围一般较小<sup>[9]</sup>,且可调谐激光器的成本较高。另一种是二维结构的光学相控阵(N×N),利用热光调制或电光调制的方式改变波导的折射率,使相邻阵元之间的相位差发生变化,从而实现光束偏转<sup>[15]</sup>。该结构在两个维度上具有相同的角度偏转能力,应用潜力更大。但现有二维结构的光学相控阵一般包含水平布置的输入光栅耦合器、分束器、移相器、输出光栅耦合器等,且移相器的尺寸较大,如热光移相器加热的金属电极尺寸一般为数百微米<sup>[16]</sup>,限制了大规模二维集成时的阵列规模。

本文提出了一种基于 Gires-Tournois(G-T)谐振腔的新型二维光学相控阵反射镜结构,该反射镜的表面规律分布着垂直于镜面的 G-T 谐振腔光学相控单元,每个 G-T 谐振腔相控单元由两个分布式

布拉格反射镜(DBR)和一个波导微腔构成。利用载流子的色散效应或热调方式控制每个光学微腔的折射率,利用 G-T 谐振腔在谐振波长附近的色散特性,用较小的谐振腔尺寸实现范围大且速度快的光学相位延迟,进而实现二维光束偏转。该光学相控阵的垂直结构和 G-T 谐振腔的色散特性减小了谐振腔的尺寸,有利于实现大规模的二维阵列集成。

## 2 G-T 谐振腔的放大相移原理

G-T 谐振腔是非对称法布里-珀罗标准具中的一种,其前反射镜的反射率  $R_1 < 1$ ,后反射镜的反射率  $R_2 = 1$ ,即不同波长的光经过后反射镜都会被反射回来。图 1 为 G-T 谐振腔的结构,其中  $d$  为镜面间距。

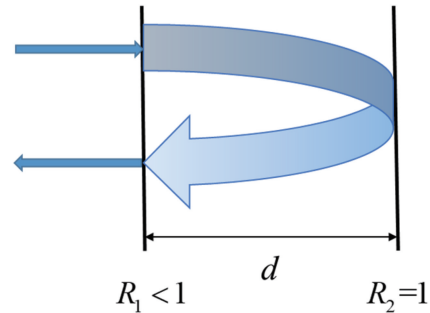


图 1 G-T 谐振腔的结构

Fig. 1 Structure of the G-T resonator

在结构无损耗的条件下,G-T 谐振腔会反射全部光强,同时对反射光施加一个相移  $\Phi$ ,其复反射率可表示为

$$r = \frac{-\sqrt{R} + \exp(-i\varphi)}{1 - \sqrt{R} \exp(-i\varphi)} = \exp(-i\Phi), \quad (1)$$

式中, $R$  为 G-T 谐振腔前端反射镜的强度反射率, $\varphi$  为光在 G-T 谐振腔内往返一次的相移,可表示为

$$\varphi = \frac{4\pi nd}{\lambda} + \rho'_1 + \rho'_2, \quad (2)$$

式中, $n$  为介质的折射率, $\lambda$  为入射光的波长, $\rho'_1$  和  $\rho'_2$  分别为两个端面反射镜引起的附加相移。由(1)式可得到

$$\exp(-i\Phi) = \frac{[\exp(-i\varphi/2) - \sqrt{R} \exp(i\varphi/2)]^2}{|1 - \sqrt{R} \exp(-i\varphi)|^2}, \quad (3)$$

$$\Phi = 2\arctan\left(\frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}} \tan \frac{\varphi}{2}\right) = 2\arctan\left(M \tan \frac{\varphi}{2}\right), \quad (4)$$

式中, $M$  为谐振波长附近由 G-T 谐振腔谐振特性带来的相移放大因子,可表示为

$$M = \frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}} \quad (5)$$

理想状态下( $R_2=1$ )G-T 谐振腔反射光的强度不会发生变化,而反射光的相位表现出强烈的色散特性。入射光的波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ , 镜面间距  $d = 4 \text{ }\mu\text{m}$ , 前反射镜的反射率  $R_1 = 0.9$  时, 仿真得到 G-T 谐振腔的介质折射率变化  $\Delta n$  和反射光的相移关系, 结果如图 2 所示。可以发现, 在谐振波长( $\varphi = 2m\pi$ ,  $m$  为整数)处会出现强烈的相位偏移, 此时相移放大倍数最大为  $M$ 。

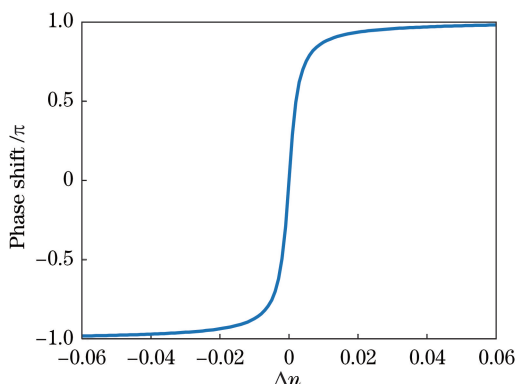


图 2 G-T 谐振腔反射光的相移随折射率的变化曲线  
Fig. 2 Phase shift of the reflected light from the G-T resonator varies with the refractive index

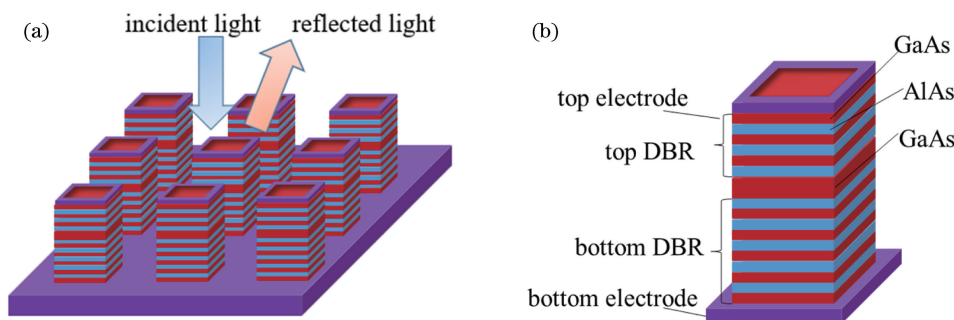


图 3 基于 G-T 谐振腔的空间二维光学相控阵反射镜。(a) 二维相控阵列模型; (b) 单个 G-T 谐振腔  
Fig. 3 Spatial two-dimensional optical phased array mirror based on G-T resonator. (a) Two-dimensional phased array model; (b) single G-T resonator

用 Lumerical 的时域有限差分(FDTD)模块进行 G-T 谐振腔结构的仿真设计, 仿真参数如表 1 所示。G-T 谐振腔由 DBR 和直波导微腔组成, DBR 由折射率不同的 GaAs 和 AlAs 薄膜交替构成, 薄膜层的厚度  $l = \lambda / (4n)$ 。与 VCSEL 形成的二维阵列结构类似, 可以用热调或电调方式调节 G-T 谐振腔的相移, 如采用与 VCSEL 阵列相似的电极设置, 通过施加不同的电压影响载流子的注入, 从而改变中间微腔的折射率, 调整 G-T 谐振腔的相移量。通过精确控制各 G-T 相移单元之间的相位差, 实现不

同角度的光束偏转。

### 3 基于 G-T 谐振腔的光学相控阵反射镜

由于 G-T 谐振腔对相移的放大特性, 通过调制腔内波导折射率的方式改变光波的相移时, 在谐振波长附近 G-T 谐振腔相移的变化率可以提高数倍到数十倍。随着谐振波长的逐渐偏离, 相移的变化率开始减小并趋于平坦, 最大相移量趋近  $\pm\pi$ 。

本方案设计的基于 G-T 谐振腔结构的光学相控阵如图 3 所示。相控阵反射镜相当于一个二维平面上的光栅, 该光栅由规则排列的 G-T 谐振腔构成, G-T 谐振腔垂直于镜面, 每个 G-T 谐振腔包含上下两个 DBR 和中间的一小段波导。可采用注入载流子或改变温度的方式调制波导的折射率。准直后的激光光束照射到该相控阵反射镜上, 通过调制每个 G-T 谐振腔内波导的折射率, 改变每个 G-T 谐振腔的相移, 使相控阵反射镜成为一个相位可编程的光栅。利用 G-T 谐振腔的相移放大作用, 可以用较小的折射率调制范围获得接近  $\pm\pi$  的相位调制深度, 快速改变衍射光的方向, 从而实现光束的二维偏转。理想情况下, G-T 谐振腔 DBR 的反射率为 1, 因此经过 G-T 谐振腔的反射光强度不会发生变化, 反射镜整体的反射率较高。

同角度的光束偏转。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Description	Value
$n_{\text{GaAs}}$	refractive index of GaAs	3.3737
$n_{\text{AlAs}}$	refractive index of AlAs	2.8924
$d/\mu\text{m}$	thickness of the cavity layer	3
$N_{\text{top}}$	pairs of DBRs of the cavity upper layer	12
$N_{\text{bottom}}$	pairs of DBRs of the cavity lower layer	28
$D/\mu\text{m}$	width of the vertical microcavity pillar	2

### 3.1 分布式布拉格反射镜的仿真

当入射光的波长为 1550 nm 时,仿真得到 DBR 的对数和反射率之间的关系如图 4 所示。根据曲线分别选择图 3(b)中上下 DBR 的层数,从而实现合适的上下 DBR 反射率。由 G-T 谐振腔的原理可知,下 DBR 的反射率应该尽可能接近于 1。从图 4 可以发现,当下 DBR 的对数为 28 时,下 DBR 的反射率为 0.9993,当下 DBR 的对数继续增大时,反射率不再有明显增长,因此,实验取下 DBR 的对数为 28。G-T 谐振腔的相移放大能力与上 DBR 的反射率相关,随着上 DBR 反射率的增大而增大,但随着反射率的增大,增加层数后反射率不再有明显提升,且会提高制作工艺的复杂度以及谐振腔对波长的敏感性,因此选取上 DBR 的对数为 12,对应的上 DBR 反射率为 0.9057。

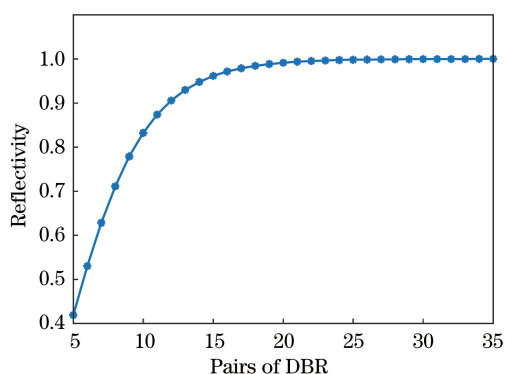


图 4 1550 nm 处 DBR 的对数和反射率之间的关系  
Fig. 4 Relationship between the pairs of DBR and reflectivity at 1550 nm

### 3.2 G-T 谐振腔结构的仿真与分析

确定上下 DBR 的层数后,根据相应 DBR 反射镜的反射率,将中间微腔的长度设为  $3 \mu\text{m}$ 。仿真设计了谐振波长为 1550 nm 处单个 G-T 谐振腔反射光强度和相位随 G-T 谐振腔折射率的变化关系,如图 5 所示。可以发现,对于单个 G-T 谐振腔,反射光的损耗小于 1%,这表明该二维相控阵反射镜的整体反射率主要由 G-T 谐振腔占据反射镜面积的占比决定;当折射率的变化量为 0.001 时,反射光的相移量达到  $0.088\pi$ 。如果不采用 G-T 谐振腔结构,在波导长度为  $3 \mu\text{m}$  及相同折射率变化量下,反射光的相移为  $0.0077\pi$ 。这表明本方案设计的 G-T 谐振腔可以在相同的波导尺寸和折射率调制范围内,将反射光的相移放大 11.4 倍,从而用小尺寸波导实现大相移。

### 3.3 光束偏转的 FDTD 仿真

用 FDTD 仿真  $1 \times 4$  阵列的光束偏转图形,当

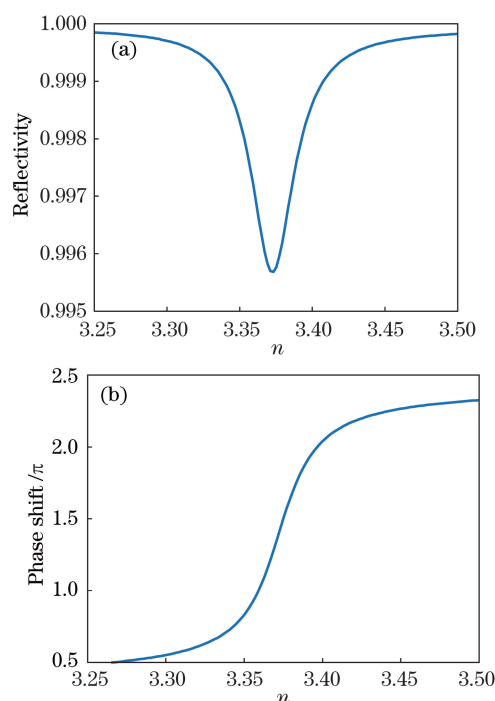


图 5 G-T 谐振腔的仿真。(a)反射率随折射率的变化曲线;(b)相移随折射率的变化曲线

Fig. 5 Simulation of the G-T resonator. (a) Change curve of the reflectance with refractive index; (b) change curve of the phase shift with refractive index

相邻阵元之间的间距为  $4 \mu\text{m}$  时,令相邻阵元之间的相位差为  $\pi/4$ ,计算得到每个阵元对应的折射率和相位如表 2 所示。此时仿真得到的远场偏转角度为  $2.7^\circ$ ,与理论计算相符,如图 6 所示。

表 2 FDTD 仿真时的参数

Table 2 Parameters during FDTD simulation

Index	Phase / rad
3.3712	4.2825
3.3793	5.1493
3.3839	5.9321
3.4036	6.7399

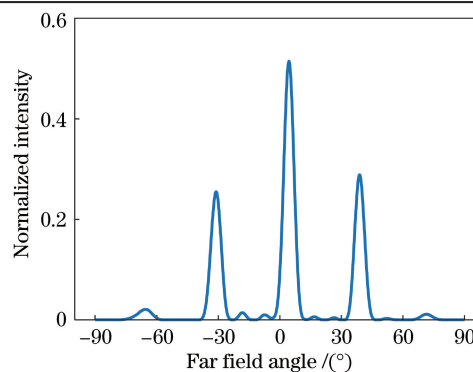


图 6 远场光束的分布

Fig. 6 Distribution of the far field beam

### 3.4 最大光束偏转角度的计算

在 G-T 谐振腔之间的间距为  $4\ \mu\text{m}$ , 入射光波长为  $1550\ \text{nm}$  时, 进一步仿真分析了最大光束偏转的情况。由理论分析可知, 受波导间距的限制, 不发生混叠时的最大偏转角为  $11.2^\circ$ 。设置波导个数为

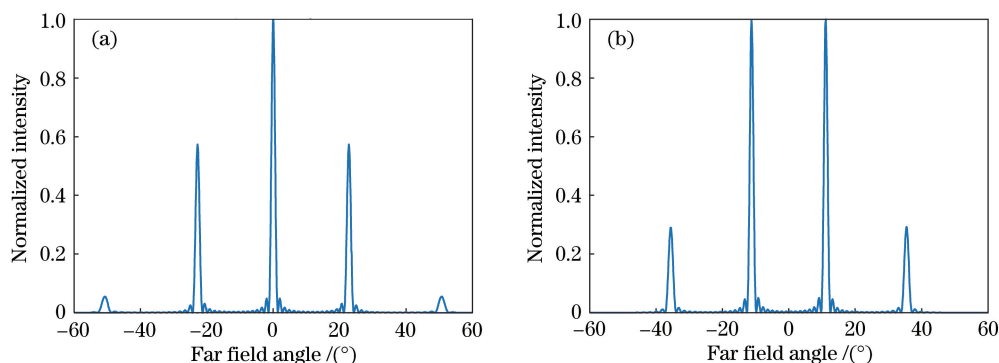


图 7 远场光束的分布。(a)相邻阵元相位差为 0;(b)相邻阵元相位差为  $\pi$

Fig. 7 Distribution of the far field beam. (a) Phase difference between adjacent elements is 0; (b) phase difference between adjacent elements is  $\pi$

## 4 结 论

提出了一种新型的可用于二维光学相控阵的反射镜结构, 该结构利用 G-T 谐振腔的谐振作用提升相移效率, 缩小波导尺寸, 且其垂直方向上的分布便于进行二维集成。对该结构的光束偏转情况进行了仿真。结果表明, 在 G-T 谐振腔之间的间距为  $4\ \mu\text{m}$ , 相邻阵元之间的相位差为  $\pi$  时, 可实现的最大偏转角为  $11.2^\circ$ , 为二维光学相控阵的实用化提供了一种有潜力的技术方案。

### 参 考 文 献

- [1] Zhuang D W, Han X C, Li Y X, et al. Silicon-based optoelectronic integrated optical phased array [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 050001.  
庄东炜, 韩晓川, 李雨轩, 等. 硅基光电子集成光控相控阵的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 050001.
- [2] Poulton C V, Yaacobi A, Cole D B, et al. Coherent solid-state LIDAR with silicon photonic optical phased arrays [J]. Optics Letters, 2017, 42(20): 4091-4094.
- [3] Heck M J R. Highly integrated optical phased arrays: photonic integrated circuits for optical beam shaping and beam steering[J]. Nanophotonics, 2017, 6(1): 93-107.
- [4] Meyer R A. Optical beam steering using a multichannel lithiumtantalate crystal [J]. Applied Optics, 1972, 11(3): 613-616.
- [5] Kwong D, Hosseini A, Zhang Y, et al.  $1 \times 12$  unequally spaced waveguide array for actively tuned optical phased array on a silicon nanomembrane [J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(5): 051104.
- [6] van Acoleyen K, Komorowska K, Bogaerts W, et al. One-dimensional off-chip beam steering and shaping using optical phased arrays on silicon-on-insulator [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(23): 3500-3505.
- [7] Yaacobi A, Sun J, Moresco M, et al. Integrated phased array for wide-angle beam steering [J]. Optics Letters, 2014, 39(15): 4575-4578.
- [8] van Acoleyen K, Bogaerts W, Jágerská J, et al. Off-chip beam steering with a one-dimensional optical phased array on silicon-on-insulator [J]. Optics Letters, 2009, 34(9): 1477-1479.
- [9] Hutchison D N, Sun J, Doylend J K, et al. High-resolution aliasing-free optical beam steering [J]. Optica, 2016, 3(8): 887-890.
- [10] van Acoleyen K, Bogaerts W, Baets R. Two-dimensional dispersive off-chip beam scanner fabricated on silicon-on-insulator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(17): 1270-1272.
- [11] Hulme J C, Doylend J K, Heck M J R, et al. Fully integrated hybrid silicon two dimensional beam scanner [J]. Optics Express, 2015, 23(5): 5861-5874.
- [12] Poulton C V, Yaacobi A, Su Z, et al. Optical phased array with small spot size, high steering range and grouped cascaded phase shifters [C] // Integrated

- Photonics Research, Silicon and Nanophotonics, July 18-20, 2016, Vancouver, Canada. Washington, D. C. : OSA, 2016: IW1B.2.
- [13] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale nanophotonic phased array[J]. Nature, 2013, 493 (7431): 195-199.
- [14] Zhao C, Peng C, Hu W. Blueprint for large-scale silicon optical phased array using electro-optical micro-ring pixels[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 17727.
- [15] Abiri B, Aflatouni F, Rekhi A, et al. Electronic two-dimensional beam steering for integrated optical phased arrays [C] // Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics, March 9-13, 2014, San Francisco, California, US. Washington, D. C. : OSA, 2014: M2K.7.
- [16] Tang H X. One-dimensional optical beam steering based on a silicon photonic phased array[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018. 唐洪席. 基于硅基相控阵的一维光束偏转研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.